

# ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

*к.ф.-м.н. Ломаев С.Л.*

Католический Университет Левен, г. Левен, Бельгия,  
[stepan.lomaev@mtm.kuleuven.be](mailto:stepan.lomaev@mtm.kuleuven.be)

Метод электромагнитной левитации позволяет осуществить высокоскоростную безтигельную кристаллизацию металлических сплавов, необходимую для получения особых метастабильных твердых фаз в перитектических сплавах на основе железа и тройных сплавов титан-алюминий-ниобий, имеющих важное практическое применения. В работе при помощи методов численного моделирования исследуется влияние конвективного перемешивания расплава на отбор фаз и кристаллическое структурообразование при фазовых превращениях.

Метод электромагнитной левитации основан на взаимодействии электрического тока, текущего внутри металлического образца, с магнитным полем. Магнитное поле индуцируется переменным током, который течет в катушке индуктивности (рис.1). Дизайн катушки может быть различным в зависимости от условий эксперимента.

Переменное магнитное поле индуцирует в свою очередь электрические токи внутри образца. В результате внутри образца возникает сила Лоренца, которая в условиях наземного эксперимента компенсирует силу тяжести, а в условиях микрогравитации (эксперимента на космической станции) служит механизмом фиксации образца в нужном положении.

Ток, текущий внутри образца, выделяют тепло, что приводит к плавлению образца. Последующее охлаждение, необходимое для кристаллизации образца, происходит за счет обдува образца охлажденным инертным газом.

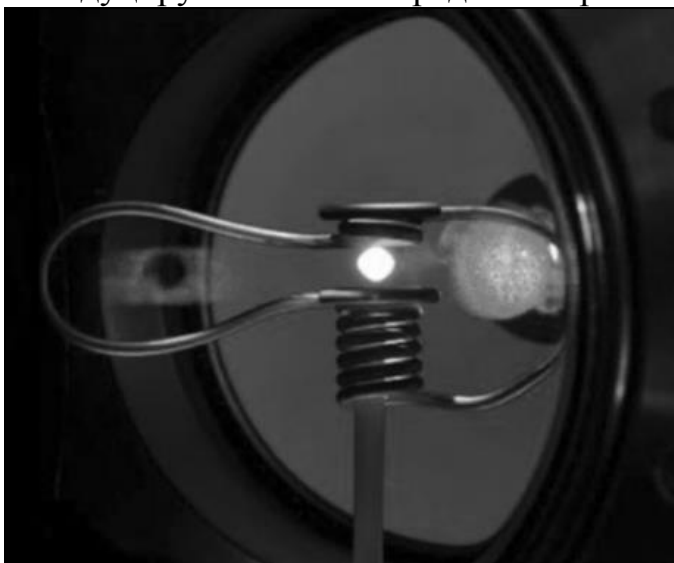


Рис.1. Установка для электромагнитной левитации в Германском Аэрокосмическом Центре в Кельне. В катушке течет переменный ток. Между нижними и верхними ободками катушки находится левитирующая капля расплавленного металла.

Поскольку кристаллизация протекает в отсутствии контакта с твердой фазой (стен контейнера), в условиях электромагнитной левитации удается

достичь переохлаждения жидкой фазы на десятки и даже сотни градусов Кельвина ниже равновесной температуры кристаллизации [1]. В таких условиях кристаллизация носит высокоскоростной характер, что значительным образом влияет на процесс формирования фаз. В частности в закристаллизовавшемся образце удастся получить высокую долю метастабильных фаз, необходимых для разработки нового класса магнитных и конструкционных материалов на основе сплавов железа с Ni, Co, Pt и Pd и сплавов Ti-Al-Nb, используемых в промышленности.

Сила Лоренца в расплавленном образце распределяется не равномерно, что вызывает внутреннюю конвекцию. В наземных экспериментах конвекция внутри образца достаточно высока и достигает 30 см/с для образцов радиусом 3 мм [2]. Значительное уменьшение конвекции удастся достичь в условиях микрогравитации, которые можно реализовать на борту космической станции.

Международный проект Европейского космического агентства (ESA) «Peritectic alloy rapid solidification with electromagnetic convection» (PARSEC) посвящен изучению влияния конвективного перемешивания расплава на отбор фаз и кристаллическое структурообразование при фазовых превращениях в перитектических сплавах на основе железа и тройных сплавов титан-алюминий-ниобий.

Целью исследований является создание технологии контроля фазово-структурных характеристик получаемых образцов за счет управления интенсивностью конвективного перемешивания расплава в переменном электромагнитном поле. Влияние конвекции на фазовые превращения и развитие микроструктуры было подтверждено предыдущими исследованиями затвердевания образцов, переохлажденных ниже равновесной температуры кристаллизации, с использованием оборудования для электромагнитной левитации TEMPUS в условиях невесомости. Данные эксперименты проводились для системы Fe-Co в рамках проекта MAGNEPHAS 2004-8гг ESA и для Fe-Cr-Ni в рамках КЭ STS-94, финансировавшего НАСА [3].

Для проведения на борту МКС безтигельной плавки и кристаллизации образцов используется печь для электромагнитной левитации MSL-EML. Возможности указанной аппаратуры позволяет достичь контролируемого уровня конвективного перемешивания расплава, что используется для изучения влияния конвекции на скорости зарождения и роста стабильных и метастабильных кристаллических фаз. Основным анализируемым параметром выступает время задержки между зарождением метастабильной фазы и последующим ее превращением в стабильную фазу в процессе высокоскоростной кристаллизации. С этой целью положение, морфология и скорость фронта затвердевания как стабильной, так и метастабильной фаз будут фиксироваться высокоскоростной видеокамерой. Выбор исследуемых сплавов мотивирован возможностью зарождения первичной метастабильной

ОЦК фазы и последующим превращением в стабильную ГЦК фазу, которое наблюдается в сплавах железа с Ni, Co, Pt и Pd.

В рамках проекта PARSEC, который включает в себя несколько исследовательских групп из разных стран, группа Католического Университета Левен занимается численным моделированием течения жидкости в расплавленном образце, теплопереносом и явлений зарождения.

В силу того, что гидродинамические процессы, процесс теплопереноса и зарождения фаз оказывают взаимное влияние друг на друга, в проекте ставилась задача создать единый пакет программ, в котором учитывается взаимодействие этих процессов, а также существует возможность реализовывать большое количество расчетов для поиска конечного решения методом последовательных приближений.

Для реализации данной задачи было найдено полное аналитическое описание векторного электромагнитного потенциала, силы Лоренца и источника тепла, связанного с электрическим током, текущими внутри расплавленного образца.

Было показано, что для исследуемой магнитогидродинамической задачи приближение сферически симметричной капли является адекватным. С помощью метода функций тока, а также, так называемых, рядов Ван Дайка, удалось свести уравнение Навье-Стокса для трехмерной задачи, к системе одномерных дифференциальных уравнений. Решение данной системы реализовано с помощью методов конечных элементов.

Был произведён расчет процессов гидродинамики и теплопереноса для различных дизайнов левитаторов в условиях земной гравитации, а также в условиях микрогравитации. Было предложены оптимальные режимы работы, позволяющие снизить интенсивность конвекции.

В настоящее время ведется разработка части пакета программ, описывающая процесс зарождения-роста. В модели учитывается взаимодействие зародышей на ранней стадии зарождения по средства тепловых полей. Данная модель была ранее опробована в проекте проекта MAGNEPHAS 2004-08 гг [3].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Robert W Hyers. Fluid flow effects in levitated droplets. Meas. Sci. Technol. 16 (2005) 394-401
  2. R.Ernst, G.Garnier, P.Retitpas, C.Trassy. Numerical modeling of a levitated liquid in a cold crucible. Expert from the proceeding of the COMSOL users conference 2007, Grenoble.
- M. Krivilov, J. Fransaer. Effects of transient heat and mass transfer on competitive nucleation and phase selection in rapid solidification – Chap. 7 in the book of Solidification of Containerless Undercooled Melts, 2012